

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND
Füüsika instituut

Ivar Mahhonin

Bakalaureusetöö arvutitehnikas (12 EAP)

SATELIITIDE JÄLGIMISE OPTIMEERIMINE MAAJAAMADES

Juhendajad: Urmas Kvell

Lauri Kimmel

Tõnis Eenmäe

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja *allkiri, kuupäev*

Juhendaja *allkiri, kuupäev*

Juhendaja *allkiri, kuupäev*

Tartu 2013

1 Sisukord

| | | |
|-------|--|----|
| 2 | Sissejuhatus | 4 |
| 3 | Satelliitide jälgimine | 5 |
| 3.1 | Satelliidi trajektoori esitamine | 5 |
| 3.2 | Antenni suunadiagramm | 7 |
| 3.3 | Antennide suunamise piirangud | 9 |
| 3.4 | Ülelendude liigitamine | 10 |
| 3.5 | Antennipöörade juhtimine..... | 13 |
| 3.5.1 | Satelliidi jälgimise tarkvara Gpredict | 13 |
| 3.5.2 | Missioonijuhtimiskeskuse tarkvara ehitamise raamistik Hummingbird... | 14 |
| 3.5.3 | Sõnumiteenuskeskkond ActiveMQ..... | 14 |
| 3.5.4 | Orbitaaldünaamika teek Orekit..... | 15 |
| 4 | Optimeerimise mooduli kavandamine | 16 |
| 4.1 | Arvutuste moodul..... | 16 |
| 4.2 | Optimeerimise moodul..... | 16 |
| 4.3 | Antenni pöörade juhtimine..... | 17 |
| 5 | Optimeerimise mooduli realiseerimine | 19 |
| 5.1 | Programmeerimiskeele Java valiku põhjused | 19 |
| 5.2 | Andmete vastuvõtmine missioonijuhtimiskeskusest..... | 19 |
| 5.3 | Satelliidi trajektoori arvutuste moodul..... | 21 |
| 5.4 | Optimeerimise moodul..... | 21 |
| 5.4.1 | Tartu Observatooriumi satelliitide maajaama antennipöörade..... | 23 |
| 5.4.2 | Tartu Ülikooli satelliitide maajaama antennipöörade..... | 27 |
| 5.5 | Optimeeritud andmete edastamine antennipööradesse | 28 |
| 6 | Satelliitide jälgimise optimeerimise testimine | 30 |
| 6.1 | Vahendid..... | 30 |
| 6.2 | Tarkvaralise testimise tulemused | 30 |
| 6.2.1 | Tartu Ülikooli satelliitide maajaama pöörade testimine..... | 32 |
| 6.2.2 | Tartu Observatooriumi satelliitide maajaama pöörade testimine | 35 |
| 6.2.3 | Riistvaraline testimine | 35 |
| 7 | Kokkuvõte | 38 |
| 8 | Summary | 39 |
| 9 | Kasutatud kirjandus..... | 41 |
| 10 | Lisad..... | 42 |
| | Lisa 1. Lihtlitsents | 42 |

| | |
|--|----|
| Lisa 2. Lähtekood | 43 |
| Lisa 3. Bamboo testimise raaport | 44 |

2 Sissejuhatus

Käesoleva bakalaureusetöö põhieesmärgiks on satelliitide jälgimise optimeerimine maajaamades. Kuna maajaamade antennide liikumine on mehaaniliselt piiratud, siis seab see ka piirangud madalal Maa orbiidil tiirlevate satelliitide pidevale jälgimisele. Seetõttu võib side satelliidiga ka ühe ülelennu jooksul katkeda.

Tartu Ülikooli satelliitside maajaama jaoks on oluline pideva side toetamine satelliidiga ESTCube-1 [\[1\]](#), sest sellest sõltub terve missiooni edukus: kui satelliidi positsiooni jälgimisel esineb raskusi, siis toob see endaga kaasa andmepakettide kao sideseansi jooksul.

Satelliitide jälgimise optimeerimine maajaamades on levinud probleem ka teistes satelliitside jaamades, aga hetkel puudub olemasolev vabalt kättesaadav universaalne lahendus.

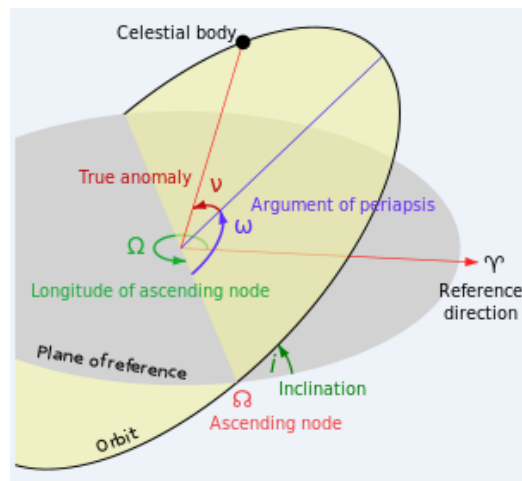
ESTCube-1 projektis oli maajaama antennipööraja juhtimiseks kasutusel tarkvara Gpredict [\[2\]](#). Selle põhifunktsionaalsus võimaldab arvutada satelliidi jooksvat trajektoori ja edastada käsked antennipöörajale satelliidi jälgimiseks. Gpredict'i peamiseks puuduseks on piiratud funktsionaalsus satelliitide jälgimise optimeerimiseks erinevate antennipöörajatega. Satelliidi ESTCube-1 missioonjuhtimise tarkvara põhineb avatud lähtekoodiga Hummingbird'i Java raamistikul. Antud raamistiku puuduseks on satelliitide jälgimise optimeerimise mooduli puudumine.

Käesoleva töö eesmärgid on:

- kavandada tarkvaramoodul, mis arvutab satelliidi ülelennu trajektoori konkreetses ajavahemikus,
- mooduli testimine ühiktestidega (lähtekoodi kattuvus testidega üle 70 protsendi) ja selle katsetamine reaalsetes olukordades,
- kavandada tarkvaramoodul, mis analüüsib etteantud satelliidi ülelennu trajektoori ja lähtuvalt antennipöörajast optimeerib pööraja juhtimise käsud satelliidi pidevaks jälgimiseks,
- optimeerimismooduli testimine ühiktestidega (lähtekoodi kattuvus testidega üle 70 protsendi) ja selle katsetamine Tartu Ülikooli satelliitside maajaamas erinevate satelliitidega.

3 Satelliitide jälgimine

Satelliit liigub meie planeedi ümber mööda kindlat orbiiti. Satelliidi positsiooni orbiidil kirjeldatakse kasutades parameetreid, mis võimaldavad arvutada satelliidi asukohta mistahes ajahetkel. Meie kasutame Kepleri orbiidi lähendit (vt. joonis 1), kus orbiidil liikuva keha asukohta saab kirjeldada kuue parameetriga: ekstsentrilisus (e , ingl. k. *eccentricity*), suur pooltelg (a , ingl. k. *semimajor axis*), kaldenurk (i , ingl. k. *inclination*), tõususõlme laiuskraadid (Ω , ingl. k. *longitude of the ascending node*), periapsise argument (ω , ingl. k. *argument of periapsis*), keskmine anomaalia (v , ingl. k. *mean anomaly*).



Joonis 1. Kepleri orbiit koos seda määravate parameetritega [3].

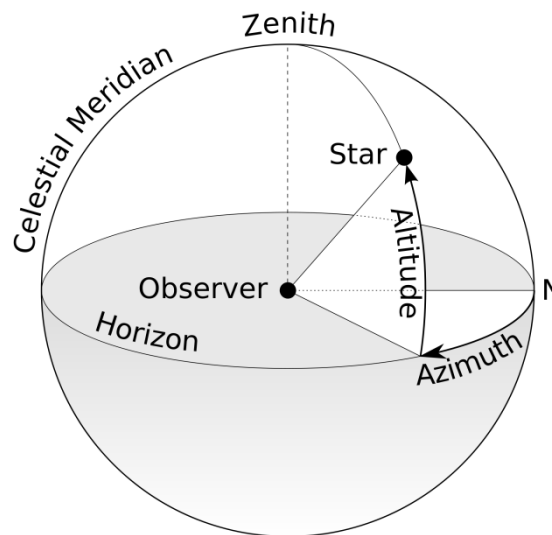
Praktiliseks satelliitide jälgimiseks esitatakse nimetatud parameetreid TLE-formaadis. Sellise kaherealise formaadi nimetus on TLE, ingl. k. *Two-Line Element set*. Tänu oma kompaktsusele, on antud formaat laialt kasutusel satelliidi orbiidi parameetrite levitamiseks ja satelliidi asukoha leidmiseks suvalises asukohas ja suvalisel ajal. Näitena on toodud joonisel 2 rahvusvahelise kosmosejaama ISS üks TLE.

```
1 25544U 98067A 08264.51782528 -.00002182 00000-0 -11606-4 0 2927
2 25544 51.6416 247.4627 0006703 130.5360 325.0288 15.72125391563537
```

Joonis 2. Rahvusvahelise kosmosejaama ISS orbiidi parameetrid TLE-formaadis, mis on välja antud 2008. aastal 264. päeval. [4]

3.1 Satelliidi trajektoori esitamine

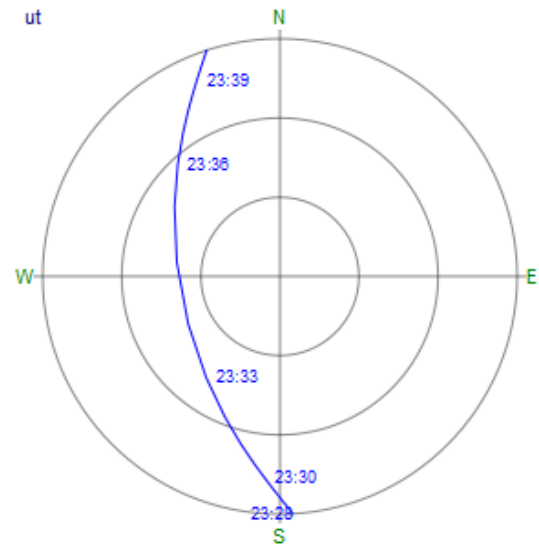
Satelliidi ülelennu trajektoor satelliitside maajaama suhtes esitakse tavaliselt horisondilises koordinaatsüsteemis, kus satelliidi asukoht taevast on määratud asimuudi ja elevatsiooni (kõrgus horisondist) kaudu (vt. joonis 3).



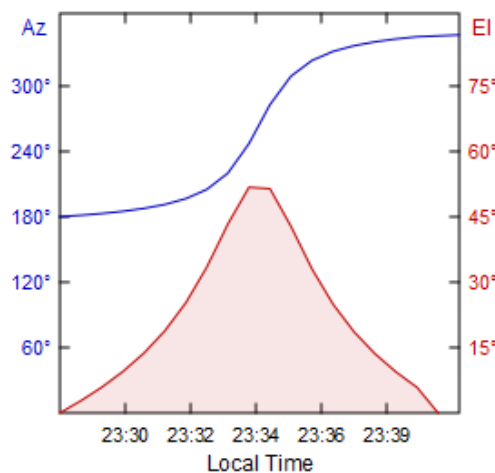
Joonis 3 . Horisondiline koordinaatsüsteem. [5]

Asimuut on nurk põhjapunkti ja seniiti läbiva suuringi ning satelliidi asukohta ja seniiti läbiva suuringi vahel. Asimuudi mõõdetakse põhjapunktist ida suunas. Elevatsioon on nurk horisondi ja satelliidi asukoha vahel, mõõdetuna piki satelliidi asukohta läbivat suuringi.

Joonisel 4 on kujutatud satelliidi ESTCube-1 trajektoor taevafääril, vaadelduna Tartust ühe ülelennu jooksul. Toodud trajektoori puhul on näha, et ülelennu algushetkel on asimuudi väärtus 184 kraadi ja elevatsiooni väärtus on 0 kraadi. Ülelennu kõrgeimas punktis on asimuudi väärtus 270 kraadi ja elevatsioon 39 kraadi. Joonisel 5 on näha kuidas asimuudi ja elevatsiooni väärtused muutuvad täpsemalt.



Joonis 4. Satelliidi ESTCube-1 trajektoor Tartu Ülikooli satelliitside maajaama suhtes (ülestõusu algus 23. mail 2013 kell 23:20). Kellaajad trajektoori peal näitavad ajahetki mil satelliit ületab seda punkti. Elevatsioon on antud 30-kraadise sammuga, st. välisringil on elevatsioon 0 kraadi ja joonise keskpunktis on 90 kraadi. Asimuudi väärtuse nullpunktiks loetakse põhjasuunda (joonisel tähistatud N-ga) ja see suureneb päripäeva 360 kraadini.



Joonis 5. Antud graafik näitab asimuudi ja elevatsiooni muutumist ülestõusu jooksul. Vasakpoolne telg näitab, et asimuudi väärtused muutuvad vahemikus 180 kuni 350 kraadi. Parempoolne telg näitab, et elevatsioon muutub vahemikus 0 kuni 50 kraadi.

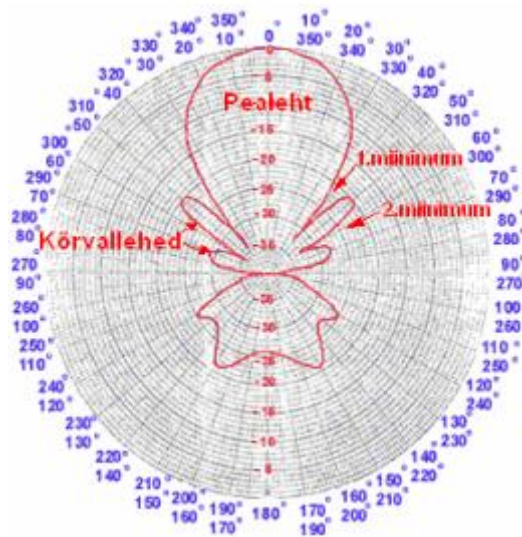
3.2 Antenni suunadiagramm

Satelliidi edukaks jälgimiseks maajaamast on oluline arvestada jaama antennide võimekusega. Jaama kirjeldamiseks kasutame antennide suunadiagramme, mis iseloomustavad antenni kiirguse amplituudi sõltuvust suunast (vt. joonis 6). Suunadiagrammi põhiomadused on järgmised:

- pealehe laius ja kiirguse tase,

- kõrvallehtede maksimaalse kiirguse tase,
- tagalehe maksimaalse kiirguse tase.

Kõrval- ja tagalehtede olemasolu näitab, et antenn kiirgab raadiolaineid mitte ainult pealehe suunas vaid ka teistesse suundadesse, mis võib suurendada raadiohäireid.



Joonis 6. Antenni suunadiagramm ühes tasandis ringkoordinaadistikus. [6]

Satelliidi ESTCube-1 peamist sidejaama, Tartu Ülikooli satelliitside maajaama, iseloomustavad parameetrid on:

- 70 cm laineala ristyagi antennid (WX7036 [7]) võimendusega 14- 16,3 dBd ja pealehe laius (3 dB piir) on 30 kraadi,
- 2 m laineala ristyagi antennid (WX214 [7]) võimendusega 12,3 dBd ja pealehe laius on 40 kraadi.

Antennide suunamiseks kasutatakse antennipööraja komplekti, mis koosneb asimuudi ja elevatsiooni pöörast. Lähtudes antennipöörajate parameetritest võime satelliitsides kasutatavad pöörjad tinglikult jagada neljaks grupiks:

- elevatsiooni pöörjad, mis pööravad maksimaalselt 90 kraadi,
- elevatsiooni pöörjad, mis pööravad maksimaalselt 180 kraadi,
- asimuudi pöörjad, mis pööravad maksimaalselt 360 kraadi,
- asimuudi pöörjad, mis pööravad rohkem kui 360 kraadi.

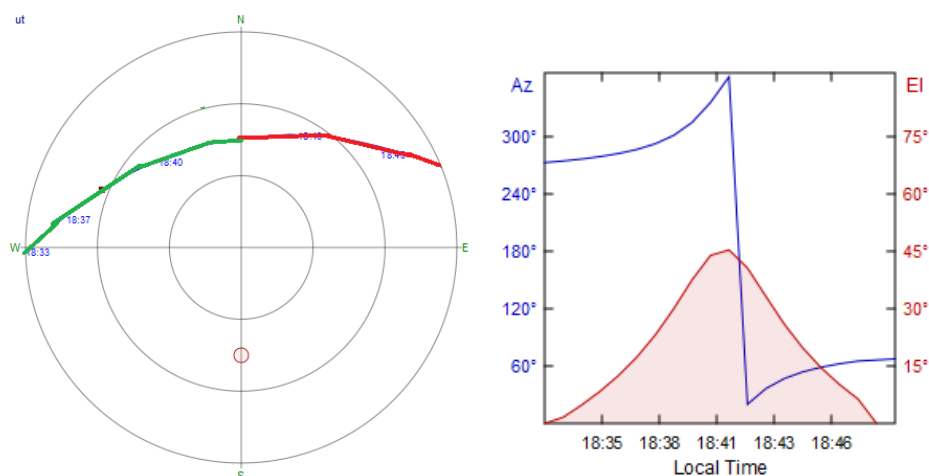
Tartu Ülikooli satelliitside maajaamas on kasutusel antennipööraja Yaesu G5500, mille ulatus elevatsioonis on 180 kraadi ja asimuudis 450 kraadi. Antud maajaama elevatsiooni pööraja kiirus on 2,68 kraadi/ s ja asimuudi pööraja kiirus on 6,20 kraadi/s.

Satelliidi ESTCube-1 raadiosideks planeeritakse rajada teine maajaam Tartu Observatooriumis, kus on antennipöörarajad, mis toetavad elevatsiooni 0 kuni 180 kraadi ja asimuudi väärtuseid 0 kuni 360 kraadi.

3.3 Antennide suunamise piirangud

Satelliidi ühe ülelennu jälgimiseks maajaamaga on tarvis jagada ülelennu trajektoori etapphaaval asimuudi ja elevatsiooni paarideks, millega juhitakse antennipöörarajaid. Edukaks raadiosideks piisab, kui suunamistäpsus on väiksem kui antenni pealehe laius. Kuid tegelikult eksisteerib madalal Maa orbiidil olevate satelliitide jälgimisel mitmeid raskuseid.

Maajaama antennid on ühendatud raadioga kaablite kaudu. Kui antennipööraraja pöörab liialt ümber oma telje, siis võivad antennikaablid keerduda ümber antennimasti ja minna katki. Et seda vältida, on antennipöörarajate liikumine mehaaniliselt piiratud. See tähendab, et antennid ei saa tavaliselt teha üle ühe täispöörde asimuudis. Seega tekib satelliitide jälgimisel sideauk, kui satelliidi trajektoori ületab põhjasuuna ehk asimuudi 0 või 360 kraadi. Teiste sõnadega, pööraraja ei saa ületada seniidi ja põhjasuuna vahelist joont, kuna selle punkti ületamine on mehaaniliselt piiratud. Näiteks, kui satelliidi ülelend algab asimuudilt 270 kraadi, liigub päripäeva 360 kraadini ja sealt edasi 15 kraadini. Satelliiti jälgides muutub antennipööraraja asimuut ühtlaselt kuni 360 kraadini, peale seda on pööraraja sunnitud tegema täispöörde, et jätkata jälgimist vahemikus 0 kuni 15 kraadi (vt. joonis 7).



Joonis 7. Ilma optimeerimiseta juhitud antennipööraraja võib jälgida satelliiti pidevalt kuni põhjasuunani (näidatud joonisel rohelise värviga). Pärast seda sooritab pööraraja

täispöörde, mille ajal on antennid suunatud satelliidist eemale ja raadioside katkeb. Seejärel jätkab antennipööraja satelliidi jälgimist (näidatud joonisel punase värviga).

Tavaliselt tekib probleem ka elevatsiooni pöörajatega, kui satelliidi ülelend on väga kõrge, st. maksimaalse elevatsiooni väärtus kasvab 90 kraadini. Sellisel kõrgel ülelennul tekib olukord, kus seniidilähedases taeva piirkonnas muutuvad asimuudi väärtused väga kiiresti. Seetõttu peab asimuudi pööraja tegema praktiliselt pool pööret loetud sekundite jooksul.

Kõrgetel ülelendudel on kindel elevatsiooni väärtus, alates millest muutub satelliidi kiirus asimuudis maajaama suhtes kiiremini, kui on antennipööraja maksimaalne kiirus. Maksimaalne kiirus sõltub antennipööraja tüübist. Tartu Ülikooli satelliitside maajaamal on nimetatud kiirus 6,2 kraadi/sekundis. Tabelis 1 on toodud maksimaalsed asimuudi muutumise kiirused erinevate elevatsioonidega ülelendudel. On näha, et Tartu Ülikooli satelliitside maajaama jaoks on antud elevatsiooni väärtus 80,2 kraadi (piir). Alates sellistest ülelendudest on vaja asimuudi pööraval tagada kiirus 4,5 kraadi/ sekundis. Paraku spetsifikatsioonis toodud 6,2 kraadi / sekundis kiiruse juures ei ole suunamise täpsus nii hea ja kiirus 4,5 jätab piisava varu kindlalt tagatud jälgimiseks.

Tabel 1. Maksimaalsed asimuudi muutumise kiirused erinevate elevatsioonidega ülelendudel.

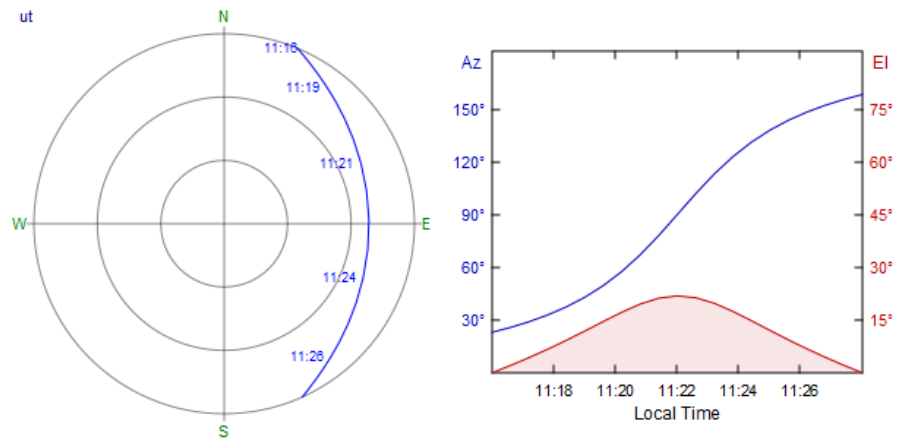
| | | | | |
|--|------|------|------|------|
| Maksimaalne elevatsioon (kraad) | 87,1 | 80,2 | 70,4 | 60,2 |
| Maksimaalne asimuudi kiirus (kraad/ s) | 16,7 | 4,5 | 2,4 | 0,7 |

3.4 Ülelendude liigitamine

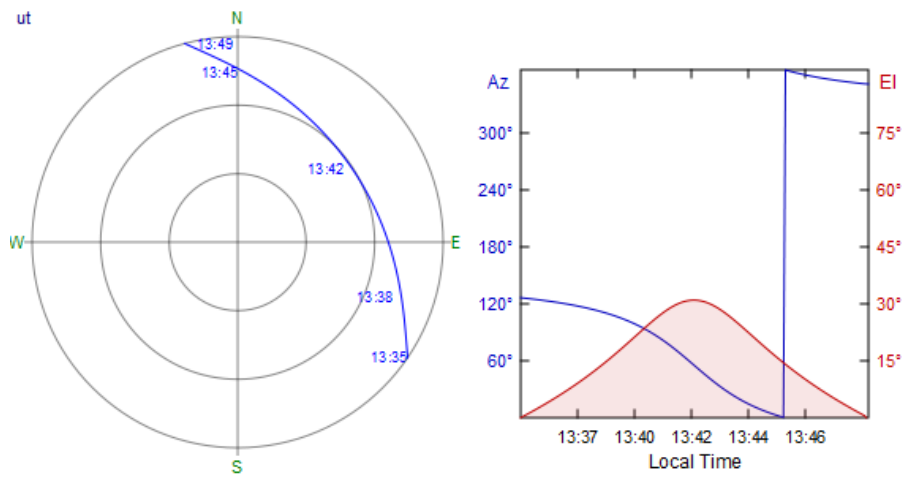
Satelliitide jälgimise seisukohalt võib erinevad ülelendude trajektoorid jagada tinglikult neljaks grupiks:

1. ülelennu trajektoor ei ületa seniidi ja põhjasuuna vahelist joont ning elevatsioon on üsna madal (vt. joonis 8).
2. ülelennu trajektoor ületab põhjasuuna aga elevatsioon on ikkagi üsna madal (vt. joonis 9).

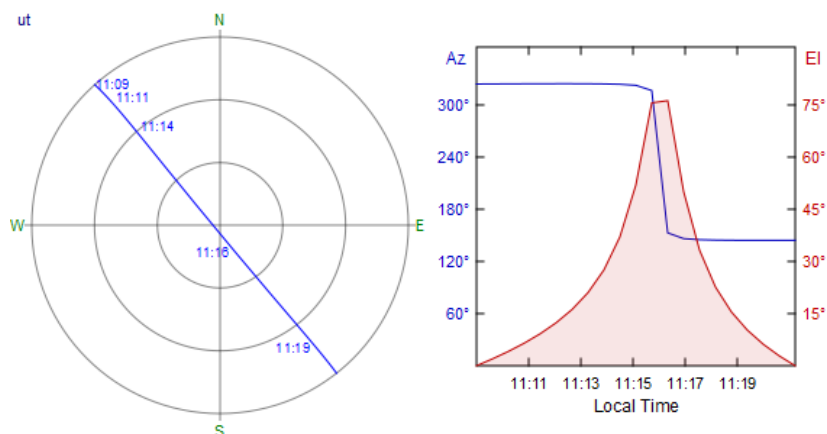
3. ülelennu trajektoor ei ületa põhjasuunda aga nüüd on ülelend kõrge (vt. joonis 10).
4. ülelennu trajektoor ületab põhjasuuna ja ülelend on kõrge (vt. joonis 11).



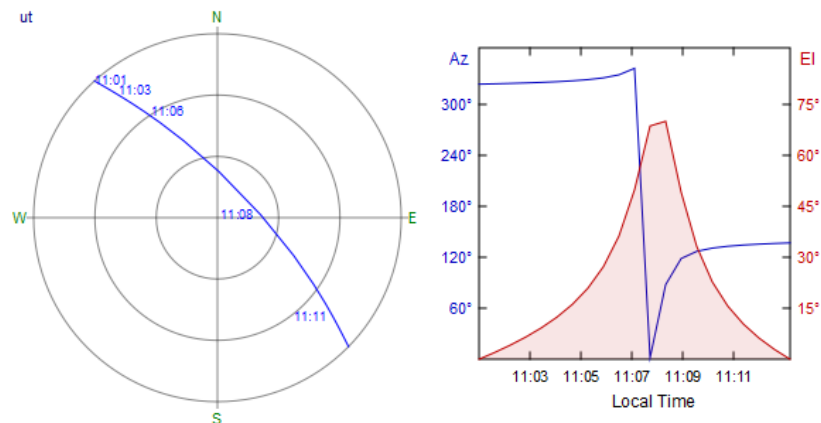
Joonis 8. Ülelendude grupp nr.1: satelliidi trajektoor ei ületa põhjasuunda ja elevatsiooni väärtused on väiksemad kui 80 kraadi.



Joonis 9. Ülelendude grupp nr. 2: satelliidi trajektoor ei ületa põhjasuunda ja elevatsiooni väärtused on väiksemad kui 80 kraadi.



Joonis 10. Ülelendude grupp nr. 3: satelliidi trajektoor ei ületa põhjasuunda ja mõned elevatsiooni väärtused on suuremad kui 80 kraadi.



Joonis 11. Ülelendude grupp nr. 4: satelliidi trajektoor ületab põhjasuunda ja mõned elevatsiooni väärtused on suuremad kui 80 kraadi.

Jälgides satelliiti, mille trajektoor kuulub 1. ülelendude gruppi (vt. joonis 8), ei teki antennipöörajatel takistusi liikumisel, sest trajektoor ei ületa põhjasuuna ja seniidi vahelist joont ja ülelend on madal. Satelliidi jälgimine on pidev.

Kui satelliidi ülelend ületab põhjasuuna ja seniidi vahelise joone (vt. joonis 9), siis kontakti ajal peab antennipööraja tegema täispöörde ja tekib katkestus raadiosides, kuna täispöörde ajal on antennid suunatud satelliidist eemale. Antennipöörajate jaoks, mille asimuudi maksimaalne väärtus on 360 kraadi, on antud asjaolu probleemne. Juhul kui asimuudi pöörjad lubavad teha pööret vahemikus, mis on suurem kui 360 kraadi, võivad nad ületada seniidi ja põhjasuuna vahelise joone kuni teatud piirväärtuseni (asimuudi pöörjate maksimaalne ulatus). Näiteks Tartu Ülikooli satelliitside maajaama asimuudipööraja suudab pöörata kuni 450 kraadini, mis tähendab 90 kraadi üle põhjasuuna.

Kui on väga kõrge ülelend, siis peab asimuudi antennipööraja tegema väga kiirelt peaaegu pool pööret, aga tavaliselt võtab see aega minuteid või isegi kauem ja sel ajal võib tekkida katkestus raadiosides. Joonisel 10 näeme, et sellistel ülelendudel võib elevatsiooni väärtus küündida kuni 90 kraadini. Antennipöörajate jaoks tähendab see, et pärast kindlat elevatsiooni kõrgust ei jõua nad enam jälgida satelliiti, kuna selle kiirus asimuudis on suurem, kui pöörjate maksimaalne asimuudi kiirus. Tavaliselt tähendab see, et antennipööraja töötab sellistel hetkedel täisvõimsusega.

Viimane kõige keerulisem olukord, kui satelliidi ülelend on kõrge ja ta ületab nullasimuudi, siis on probleemiks antennipööraja täispööre asimuudis põhjasuuna ületamisel ja asimuudi pööraja töötamine täisvõimsusega elevatsiooni kõrgetel väärtustel.

3.5 Antennipöörajate juhtimine

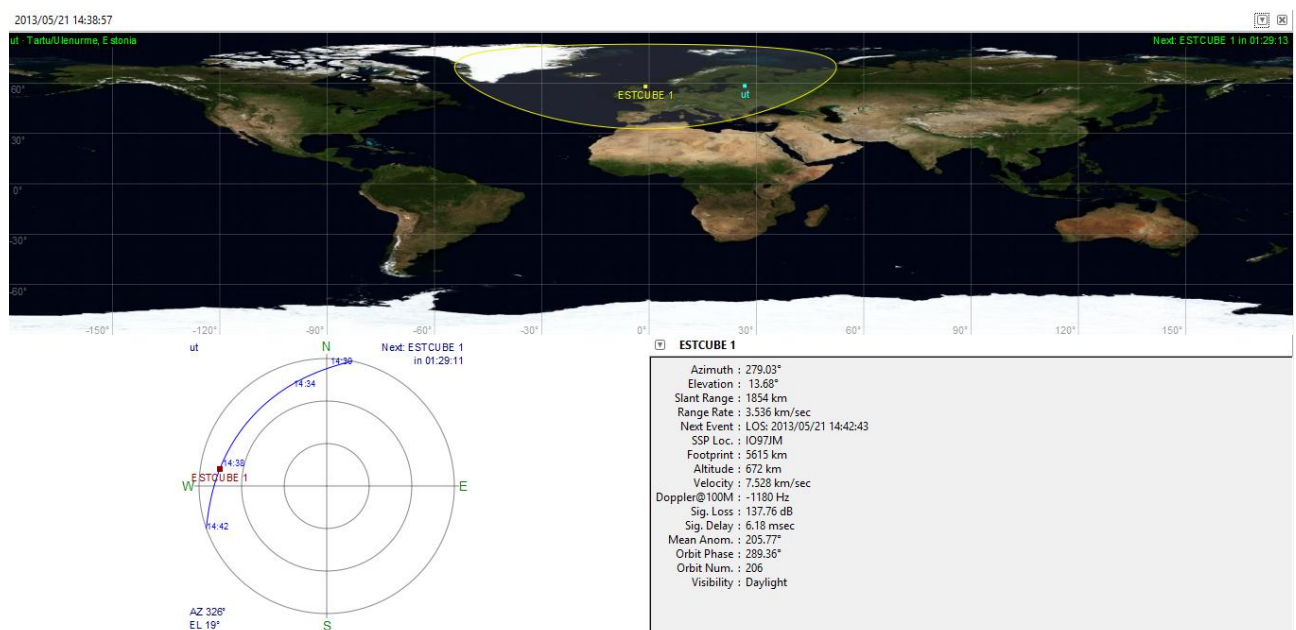
Maajaamade pöörajate juhtimiseks on olemas erinevaid tarkvaralahendusi, mis on kasutusel Tartu Ülikooli satelliitside maajaamal.

3.5.1 Satelliidi jälgimise tarkvara Gpredict

Gpredict on reaajas satelliiti jälgiv ja satelliidi trajektoori arvutav rakendus (vt. joonis 12). Gpredict oli kaua aega kasutusel Tähe-4 maajaamas põhilise kontakti planeeriva ja satelliiti jälgiva tarkvara rollis. Selle põhifunktsionaalsus, mis oli kasutusel Tartu Ülikooli satelliitsidemaajal on järgmine:

- võimaldab mugavat TLE-formaadis antud orbiidiandmete uuendamist,
- oskab arvutada ülelendude jaoks vajalikud andmed päris põhjaliselt:
 - arvutab kontaktide alg- ja lõpp-punktid ning hetked
 - oskab suhelda antennipöörajatega ja raadiojaamadega ja neid juhtida.

Antud töös on Gpredict kasutatud satelliidi trajektoori arvutamise tulemuste võrdlemiseks.



Joonis 12. Gpredict'i tarkvara kasutajaliides.

3.5.2 Missioonijuhtimiskeskuse tarkvara ehitamise raamistik Hummingbird

Satelliidi ESTCube-1 missioonijuhtimise tarkvaraks on kasutatud Hummingbird avatud lähtekoodiga Java teek infrastruktuuri jälgimis- ja kontrollsüsteemide ehitamiseks. Hummingbird pakub mugavat keskkonda ja tavafunktsionaalsust:

- satelliidi orbiiti ja ülelendude arvutamine,
- satelliidi juhtimiseks,
- maajaama segmendi süsteemi jälgimine (seahulgas protsessor, lõimed, kettaruum),
- andmete haldamine ja levitamine kasutades kõige ühiseid protokolle (JMS, HTTP, RMI, FTP, SFTP, TCP...).
- telemeetria kalibreerimine,
- sündmustest teadaandmine,
- ilmajaama jälgimiseks ning juhtimiseks.

Antud töö lahendus integreeritakse Hummingbird'i tekisse, et lisada sellele pideva satelliidi jälgimise funktsionaalsust. [\[8\]](#)

3.5.3 Sõnumiteenuskeskkond ActiveMQ

Satelliidi ESTCube-1 missioonijuhtimiskeskus koosneb erinevatest tarkvaraplokkidest. Iga plokk täidab oma funktsiooni ja on ühendatud teiste plokkidega. Nende omavaheliseks seostamiseks on vaja kuidagi korraldada nende vaheliste andmevoogude liikumist.

Tarkvaraline kommunikatsioon on loodud Java sõnumiteenuskeskkonna Apache ActiveMQ abil [\[9\]](#). Kui konkreetne tarkvaraplokk rakendab oma funktsiooni, siis ta saadab oma tulemuse ActiveMQ serverisse. ActiveMQ omakorda edastab need tulemused teistele tarkvaraplokkidele, mis saavad teada, mida ja millal neil vaja teha on. Sõnumite sisu on erinev ja sõltub konkreetse tarkvaraploki nõuetest.

Selline sõnumiringlus on sarnane sellele, kuidas närviimpulsid edastavad informatsiooni ajusse ja on mugav võimalus erinevate funktsioonidega tarkvaraplokkide vahelise kommunikatsiooni seadistamiseks.

Käesolevas töös loodud tarkvara on ühendatud missioonijuhtimiskeskusega, kasutades sarnaseid printsiipe.

3.5.4 Orbitaaldünaamika teek Orekit

Esimene samm, millega alustatakse satelliidi jälgimist, on selle jooksva positsiooni arvutamine, kasutades TLE- formaadis orbiidi andmeid. Selle ülesande jaoks on käesolevas töös kasutusel avatud lähtekoodiga Javas realiseeritud orbitaaldünaamika teek Orekit. [\[10\]](#)

Orekit'i põhifunktsionaalsus on see, et ta pakub palju valmis tehtud vahendeid satelliidi asukoha arvutamiseks.

Antud töös oli Orekit kasutusel trajektoori asimuudi ja elevatsiooni kalkuleerimiseks.

4 Optimeerimise mooduli kavandamine

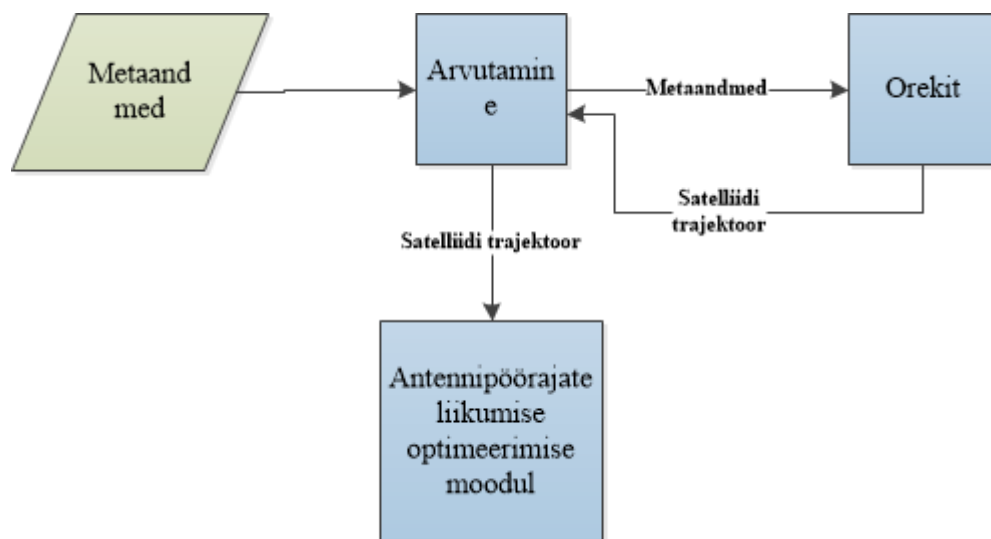
Et missiooni täita edukalt, jagasin oma töö etappideks. Optimeerimise mooduli põhiosad on:

- arvutuse moodul, mis arvutab välja satelliidi jooksva positsiooni,
- trajektoori koordinaatide optimeerimise moodul, mis optimeerib satelliidi trajektoori antennipöörajate jaoks nii, et side oleks pidev,
- antenni juhtumis osa, mis genereerid sõnumid antennipöörajate jaoks.

4.1 Arvutuste moodul

Satelliidi trajektoori arvutamiseks oli vaja luua asimuutide ja elevatsioonide väärtuste arvutamise moodulit, mis:

- tarbib satelliiti ja maajaama kirjeldavad metaandmed (vt. tabel 2) ja väljastab satelliidi trajektoori koordinaadid määratud ajavahemikus. Arvutamise moodul kasutab teegi Orekit funktsioone,
- välja arvutatud koordinaadid edastatakse optimeerimise moodulisse (vt. joonis 13).

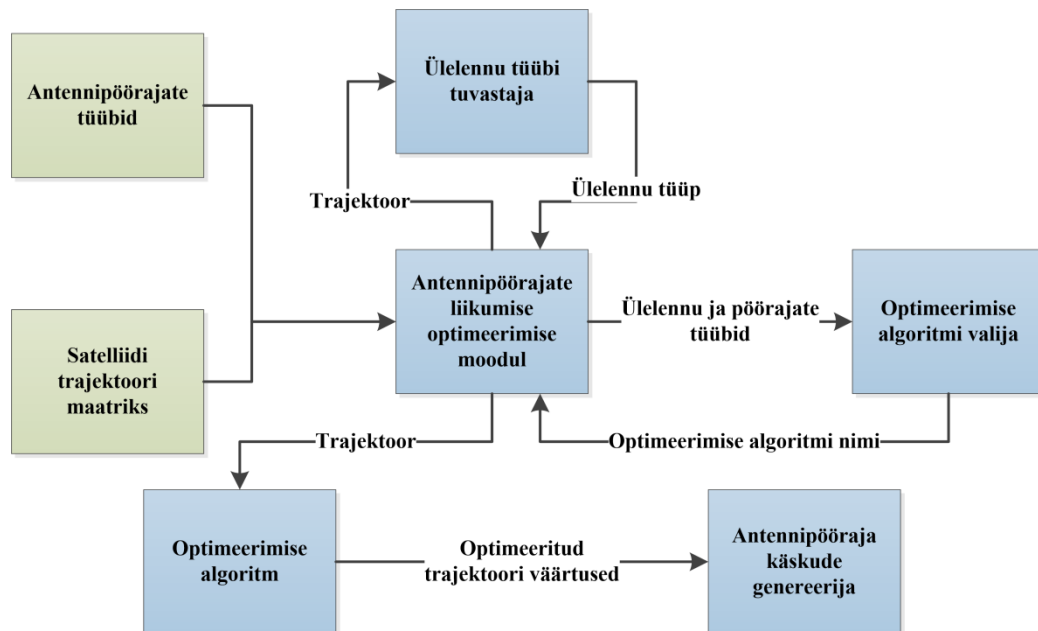


Joonis 13. Satelliidi trajektoori arvutamise mooduli tööskeem.

4.2 Optimeerimise moodul

Selle mooduli sisendiks on antennipööraja tüübi objekt ja optimeerimata satelliidi trajektoori maatriks.

- Tuvastab sisendandmete põhjal, millise ülennu tüübiga on tegemist.
- Tuvastab antennipööraja ja ülennu tüübi põhjal, millist koordinaatide optimeerimisalgoritmi rakendada.
- Rakendab koordinaatide optimeerimise algoritmi koordinaatide maatriksi peal.
- Tagastab optimeeritud koordinaadid antennipööraja juhtimissõnumite genereerijale (vt. joonis 14).

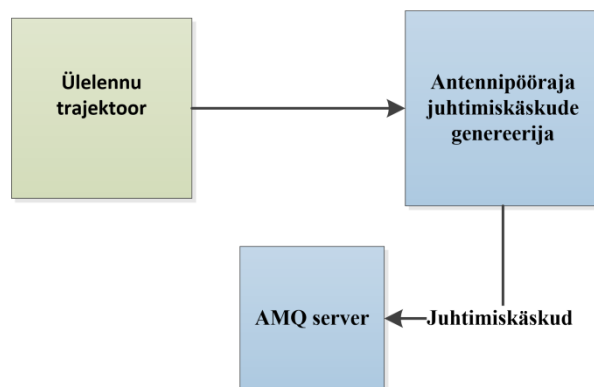


Joonis 14. Koordinaatide optimeerimise etapi tööskeem.

4.3 Antenni pööraja juhtimine

Antennipöörajate liikumise optimeerimise viimaseks etapiks on antennipöörajatele juhtimiskäskude genereerimine.

- Genereerib juhtimiskäskude antennipöörajate jaoks pidevaks satelliidi jälgimiseks.
- Edastab sõnumeid antennipöörajatele AMQ serveri kaudu (vt. joonis 15).



Joonis 15. Juhtimiskäskude genereerimise tööskeem.

5 Optimeerimise mooduli realisatsioon

5.1 Programmeerimiskeele Java valiku põhjused

Programmeerimiskeele Java valiku põhjused olid järgmised:

- Platvormiülene.
- Programmeerimiskeel Java on täielikult objektorienteeritud keel, mis lubab parem organiseerida tarkvara arhitektuuri.
- Java on laialt kasutatav programmeerimiskeel. Sellele on loodud palju valmisteeke, mida kasutades on võimalik uue rakenduse arendamisel tunduvalt aega säästa.
- Satelliidi ESTCube-1 missioonijuhtimiskeskuse pealoogika on realiseeritud programmeerimiskeeles Java, seega on uue Java projekti integreerimine sinna üsna lihtne.

5.2 Andmete vastuvõtmine missioonijuhtimiskeskusest

Et oma funktsiooni täita, mu tarkvara kasutab sisendina nn metaandmed- ehk andmeid kirjeldavad andmeid. Metaandmed on küsitud AMQ serverist kasutades minu tarkvara sõnumite tarbija klassi, mis pidevalt ootab AMQ serveri poolt sõnumeid konkreetse päisega. AMQ sõnum kujutab endast Java objekti, mille argumendid on programmis kasutatud metaandmed. Metaandmed on esitatud tabelis 2.

Tabel 2 kirjeldab AMQ'st vastuvõetud metaandmete hulka.

| Metaandmed | Kirjeldus | Kasutus |
|----------------------------|-------------------------|---|
| <i>long contactStart</i> | sidekontakti alguse aeg | sidekontakti ajad on vajalikud selle jaoks, et genereerida juhtimiskäsud antennipööraja jaoks kindlas ajavahemikuks |
| <i>long contactEnd</i> | sidekontakti lõpu aeg | |
| <i>double GS_LONGITUDE</i> | maajaama asukohta | maajaama asukohta koordinaatideks |

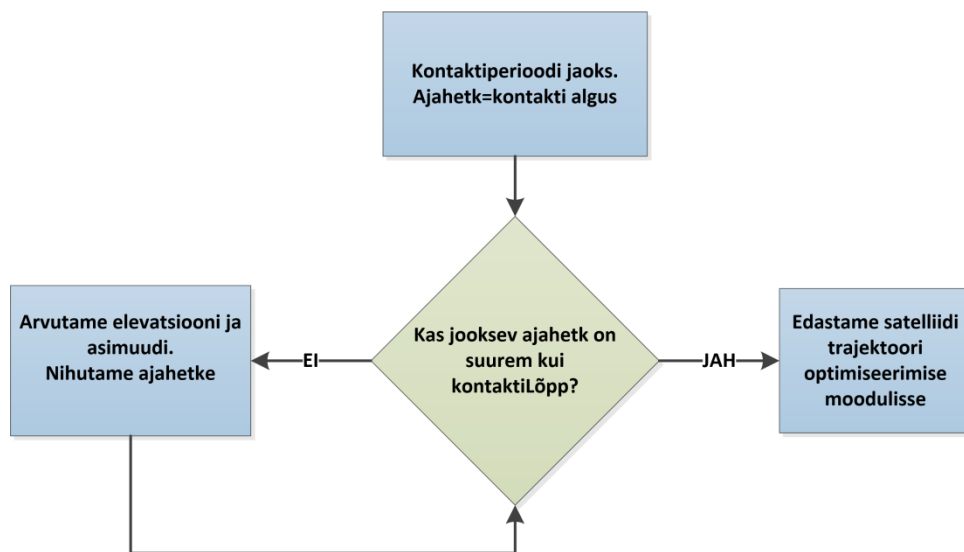
| | | |
|---|---|---|
| | geograafiline pikkuskraad | did võimaldavad teha arvutusi meie jaama suhtes |
| <i>double GS_ALTITUDE</i> | maajaama asukoha kõrgus üle merepinna | |
| <i>double GS_LATITUDE</i> | maajaama asukoha geograafiline laiuskraad | |
| <i>double uplinkFr</i> | signaali saatesagedus | saate- ja vastuvõtusagedused on kasutusel, kui me arvutame satelliidi liikumisest tingitud Doppleri nihet. |
| <i>double downlink_fr</i> | satelliidi signaali vastuvõtu sagedus | |
| <i>double gsMaxAzimuth</i> | antennipööraja asimuudi maksimaalne väärtus | antennipööraja elevatsiooni ja asimuudi maksimaalsed väärtused annavad teada, millise pööraja tüübiga on tegu ja millised ülelendude grupe selle jaoks optimeerime. |
| <i>double gsMaxElevation</i> | antennipööraja elevatsiooni maksimaalne väärtus | |
| <i>double gsReceivingSector</i> | antenni suunadiagrammi laius kraadides | |
| <i>TLE tle (String row1, String row2)</i> | satelliidi orbiidi parameetrid | objekt TLE sisaldab endas andmeid satelliidi orbiidi kohta |

5.3 Satelliidi trajektoori arvutuste moodul

Järgmine samm on metaandmete kasutamine trajektoori elevatsiooni ja asimuudi paaride väljaarvutamiseks. Paarid on vajalikud antennipööraja draiveri jaoks, kus nende abil määratakse antennide suund igaks ülelennu ajahetkeks. Terve ülelend on esitatud selliste paaride massiivina – satelliidi trajektoori koordinaatidega.

Metaandmetest on teada satelliidi ülelennu ajavahemik. Asimuudi ja elevatsiooni paaride arvutamine toimub *FOR*- tsükli sees.

Tsükli keha sees tehakse koordinaatide arvutused, kasutades teegi Orekit funktsioone. Iga uue tsükli iteratsiooniga nihutatakse edasi ajapunkti, mille suhtes arvutatakse välja elevatsiooni ja asimuudi paar. Tsükli lõpptingimuseks on valitud sidekontakti lõpu aeg (vt. joonis 16).



Joonis 16. Asimuudi ja elevatsiooni paaride arvutamise tööskeem.

Kõik välja arvutatud paarid pannakse massiivi ja edastatakse antennipöörajate liikumise optimeerimise moodulisse.

5.4 Optimeerimise moodul

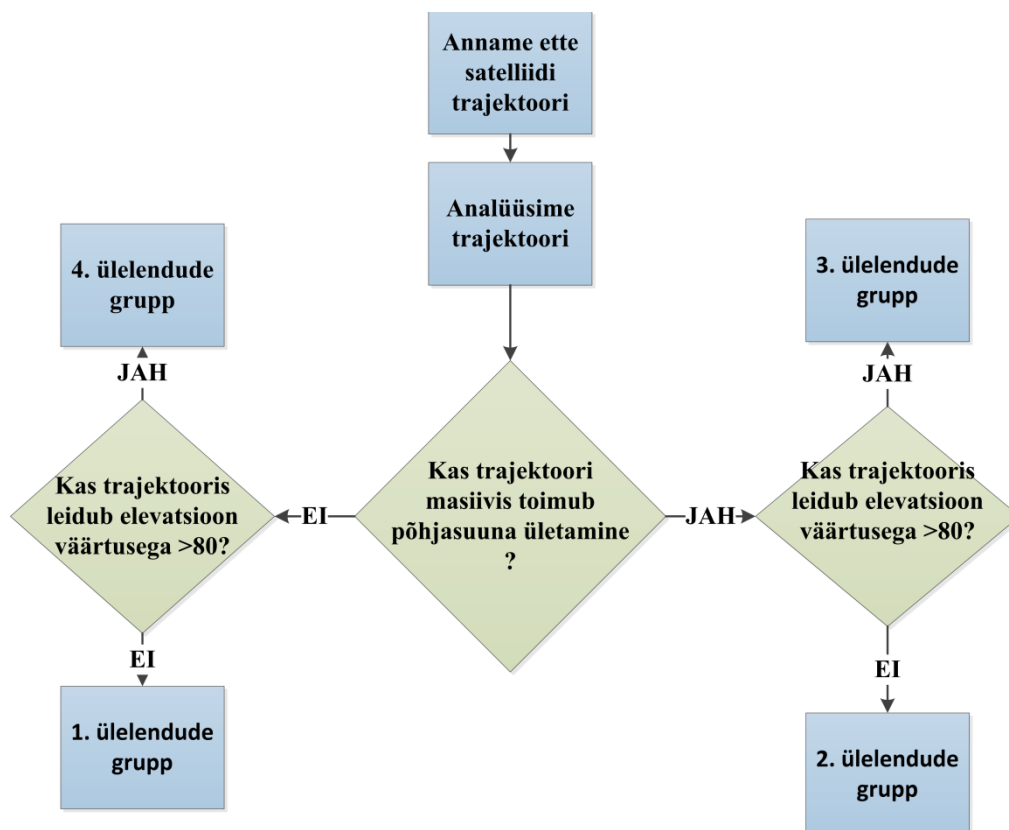
Optimeerimise mooduli peaülesandeks on:

- ülelennu grupi tuvastamine, lähtudes etteantud koordinaatide massiivist,
- koordinaatide teisendamine, lähtudes kasutatavast antennidepööraja tüübist.

Kui optimeerimise moodulile antakse ette koordinaadid, siis esimese sammuna analüüsitakse neid, et tuvastada ülelennu grupp:

- kui trajektoor ei ületa seniidi ja põhjasuuna vahelist joont ja elevatsioon on madal, siis on tegemist 1. ülelendude grupiga,
- kui trajektoor ületab seniidi ja põhjasuuna vahelist joont ja elevatsioon on madal, siis on tegemist 2. ülelendude grupiga,
- kui trajektoor ületab seniidi ja põhjasuuna vahelist joont ja elevatsioon on kõrge, siis on tegemist 3. ülelendude grupiga,
- kui trajektoor ei ületa seniidi ja põhjasuuna vahelist joont ja elevatsioon on kõrge, siis on tegemist 4. ülelendude grupiga.

Algoritmi loogilise töö põhimõtte on kujutatud joonisel 17.



Joonis 17. Ülelennu grupi tuvastamise loogika.

Antennipöörade liikumise optimeerimine on realiseeritud kahe antennipöörade tüübi jaoks, kus

- elevatsiooni ja asimuudi maksimaalsed väärtused on 180 ja 360,
- elevatsiooni ja asimuudi maksimaalsed väärtused on 180 ja 450.

Selline antennipöörjate valik on põhjendatud sellega, et antud pöörjad on kasutusel satelliidi ESTCube-1 maajaamades (Tartu Observatooriumis ja Tartu Ülikoolis).

5.4.1 Tartu Observatooriumi satelliitside maajaama antennipöörjate

1. ülelendude grupp.

Kui ülelennud kuuluvad esimesse gruppi (vt. joonis 7) , siis sellisel juhul optimeerimist ei tehta, kuna antennide asimuudi ja elevatsiooni pöörjad ei ületa maksimaalseid piirväärtuseid ja saavad jälgida satelliiti edukalt.

2. ülelendude grupp

Kui optimeerimismoodul tegeleb 2. grupi ülelendudega, siis selle põhi-optimeerimine on suunatud sellele, et vältida antennide asimuudipöörja liikumist üle nullasimuudi joone.

Antud juhtumi optimeerimiseks töötati välja algoritm, mis muudab koordinaatide paare järgmiselt:

- elevatsiooni väärtus satelliidi tõusmisel horisondi kohale on 180 kraadi ja järgnevad väärtused kahenevad ($\text{uus_väärtus} = 180 \text{ kraadi} - \text{jooksev_väärtus}$),
- asimuudi väärtusest lahutakse või liidetakse 180 kraadi ($\text{uus_väärtus} = \text{jooksev_väärtus} \pm 180 \text{ kraadi}$).

Kasutades antud algoritmi, muudab tarkvara 2. grupi ülelendude koordinaatide paare antennipöörjatele sobivamaks sellisel viisil, et satelliidi jälgimine ülelennu ajal muutub pidevaks.

Uurime konkreetset näidet. Oletame, et jooksev ülelend kuulub 2. ülelendude gruppi ja selle trajektoori asimuudi ja elevatsiooni paarid on järgmised (vt. tabel 3):

Tabel 3. 2. Ülelendude gruppi optimeerimise näide.

| Indeks | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| Asimuut | 56 | 38 | 24 | 12 | 4 | 358 | 354 | 350 |
| Elevatsioon | 35 | 33 | 30 | 25 | 20 | 16 | 12 | 8 |

Paaride massiivist on nähtav, et seniidi ja põhjasuuna vahelist joont ületatakse pärast massiivi 4. elementi. Antennipööraja alustab enda positsioneerimist pärast punkti väärtusega 4 ja liigub edasi 358 punkti suunda. Kui ta jõuab asimuudi punkti väärtusega 0, on antennipööraja sunnitud tegema täispöörde, et jõuda oma sihtpunkti (mehaaniliste blokaatorite tõttu).

Kui me rakendame antud massiivile optimeerimisalgoritmi, saame järgmised massiivi elemendid (vt. tabel 4):

Tabel 4. 2. ülelennu trajektoori põhjal genereeritud elevatsiooni ja asimuudi koordinaadid antennipööraja suunamiseks.

| Indeks | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Asimuut | 236 | 218 | 204 | 192 | 184 | 178 | 174 | 170 |
| Elevatsioon | 145 | 147 | 150 | 155 | 160 | 164 | 168 | 172 |

Tarbides optimeeritud koordinaadid antennipöörarjad saavad jälgida satelliidi pidevalt.

3. ülelendude grupp

Proovides jälgida ülelende, mis kuuluvad 3. gruppi (ülelend on kõrge ja trajektoor ei ületa nullasimuudi joont), tuleb selline ajahetk, kui satelliidi kiirus on suurem, kui asimuudi antennipööraja maksimaalne kiirus ja pööraja ei jõua jälgida satelliidi vastavalt.

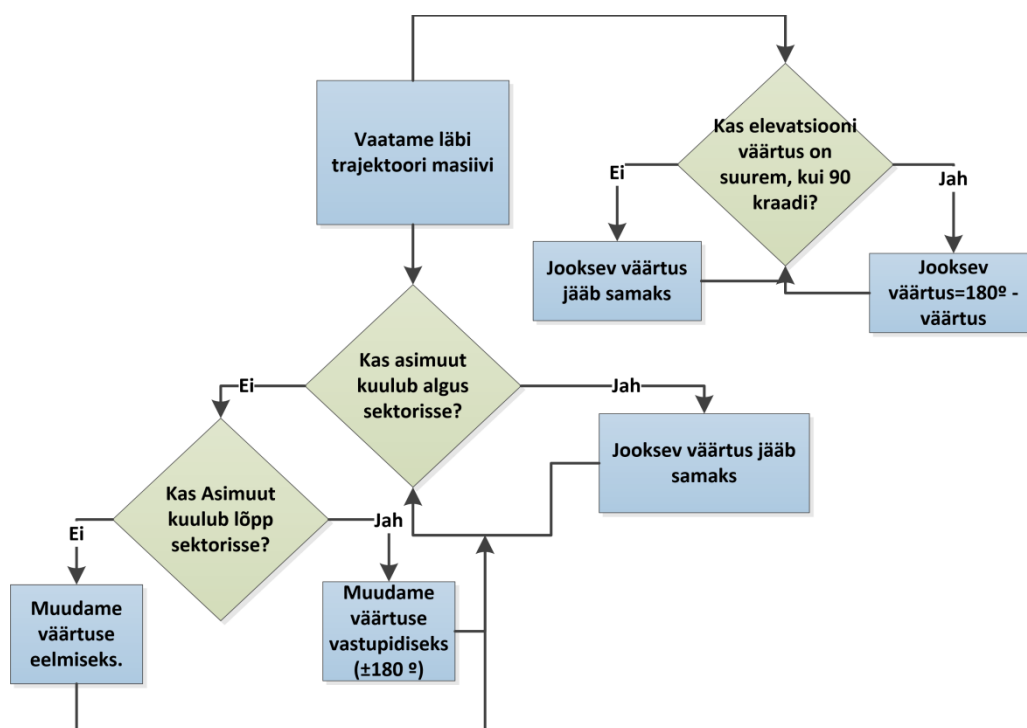
Antud olukorra lahendamiseks kasutatakse algoritmi, mis lubab liikuda asimuudi pöörasoleva kiirusega ja vältida olukorda, kus elevatsiooni pöörarjad ei saa liikuda edasi (kui nad jõuavad 90 kraadini) ja sunnivad asimuudi pöörarjad teha poolpööret, et jälgida satelliidi edasi.

Algoritm töötleb satelliidi trajektoorpunktide massiivi. Opereerib elevatsioonide ja asimuutide väärtustega paralleelselt.

Antud probleemi lahendamise mugavuseks jagasin asimuudi ringi neljaks sektoriks:

- 1. sektor 0 kuni 90 kraadi,
- 2. sektor 90 kuni 180 kraadi,
- 3. sektor 180 kuni 270 kraadi,
- 4. sektor 270 kuni 0 kraadi.

Kui jooksev asimuudi väärtus kuulub samasse sektorisse, kust algas satelliidi liikumine, siis väärtus jääb samaks. Kui asimuudi väärtused kuuluvad vahesektorisse, siis me muudame asimuudi väärtuse tema eelmiseks väärtuseks. Juhul kui asimuudi väärtus kuulub sellesse sektorisse, kus satelliit lõpetab oma ülennu, siis muudame väärtused vastupidiseks (± 180 kraadi). Paralleelselt vaatame elevatsiooni väärtuseid: kui eelmise elevatsiooni väärtus on väiksem kui jooksev, siis jääb see samaks, kui suurem, siis see teisendatakse väärtuseks, mis kuulub vahemikku 90 kraadi kuni 180 kraadi.



Joonis 18. 3. ülelendude gruppi trajektooride optimeerimine.

Rakendades antud optimeerimist on võimalik vältida olukorda, kus asimuudi pööraja ei jõua jälgida satelliiti vastavalt

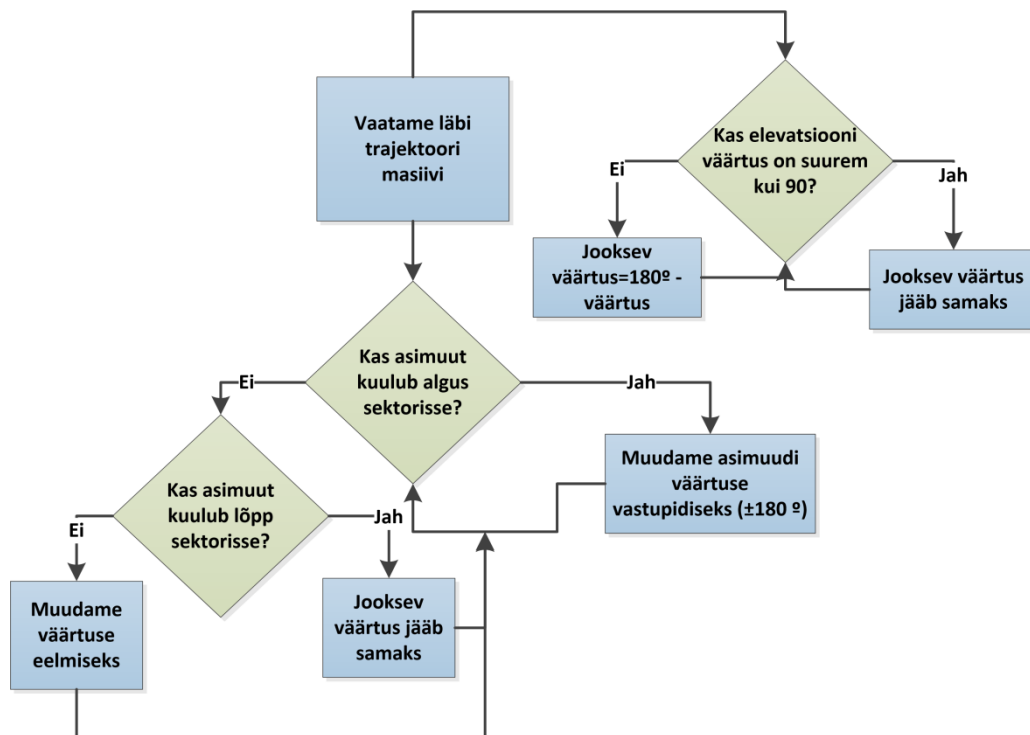
4. ülelendude grupp

Ülelennud, mis kuuluvad 4. gruppi on sarnased nendega, mis kuuluvad 3. gruppi – nad on kõrged. Ainuke erinevus on see, et nad ületavad nullasimuudi joont.

Nagu enne kirjeldatud, tavalise (mitte-optimeeritud) kõrgete ülelendude jälgimise ajal satelliidi kiirus on suurem, kui antenni asimuudipööraja maksimaalne kiirus. 4. grupi ülelendude puhul lisandub selline asjaolu, et nad ületavad seniidi ja põhjasuuna vahelist joont. See sunnib antennipöörajat ülelennu kestel tegema asimuudi täispöörde tagasi (aga võib ka edasi – olukord sõltub sellest, kust poolt ülelend nullasimuudi joone ületab).

Et sellist olukorda vältida, kasutame algoritmi, mille tööpõhimõte on sarnane algoritmi-ga 3. grupi ülelendude jaoks.

Algoritm vaatab läbi satelliidi trajektoori massiivi. Opereerib elevatsioonide ja asimuutide väärtustega paralleelselt. Kui jooksev asimuudi väärtus kuulub samasse sektorisse, kust algas satelliidi liikumine, siis väärtus muutub vastupidiseks (± 180 kraadi). Kui asimuudi väärtused kuuluvad vahesektorisse, siis me muudame asimuudi väärtuse tema eelmiseks väärtuseks. Juhul, kui asimuudi väärtus kuulub sellesse sektorisse, kus satelliit lõpetab oma ülelennu, siis väärtused jäävad samaks. Paralleelselt vaatame elevatsiooni väärtuseid: kui eelmise elevatsiooni väärtus on väiksem kui jooksev väärtus, siis see teisendatakse väärtuseks, mis kuulub vahemikku 180 kuni 90 kraadi, kui suurem, siis jääb see samaks (vt. joonis 19).



Joonis 19. 4. ülelendude gruppi trajektooride optimeerimine.

Rakendades antud optimeerimist, me väldime olukorda, kus antennipööraja ületab põhjasuuna ja asimuudipööraja liigub suure kiirusega.

5.4.2 Tartu Ülikooli satelliitside maajaama antennipööraja

Jälgides satelliiti antennipöörajaga, mille asimuudipööraja maksimaalne ulatus on 450 kraadi, siis põhilised probleemid satelliidi pideval jälgimisel on samad kui eelmise asimuudi pööraja puhul. Sellepärast on satelliidi jälgimise optimeerimine antud antennipööraja tüübi puhul on sarnane nagu eelmise pöörajatüübi puhul.

Kuna antennipööraja funktsionaalsus lubab teha lisapööret vahemikus 360 kuni 450 kraadi, siis optimeerimisalgoritmi optimeerimine seisneb selles, kuidas kasutada 90 kraadist põhja ja idasuuna vahele jäävat “lisavahemikku” satelliidi pidevaks jälgimiseks.

1. ülelendude grupp

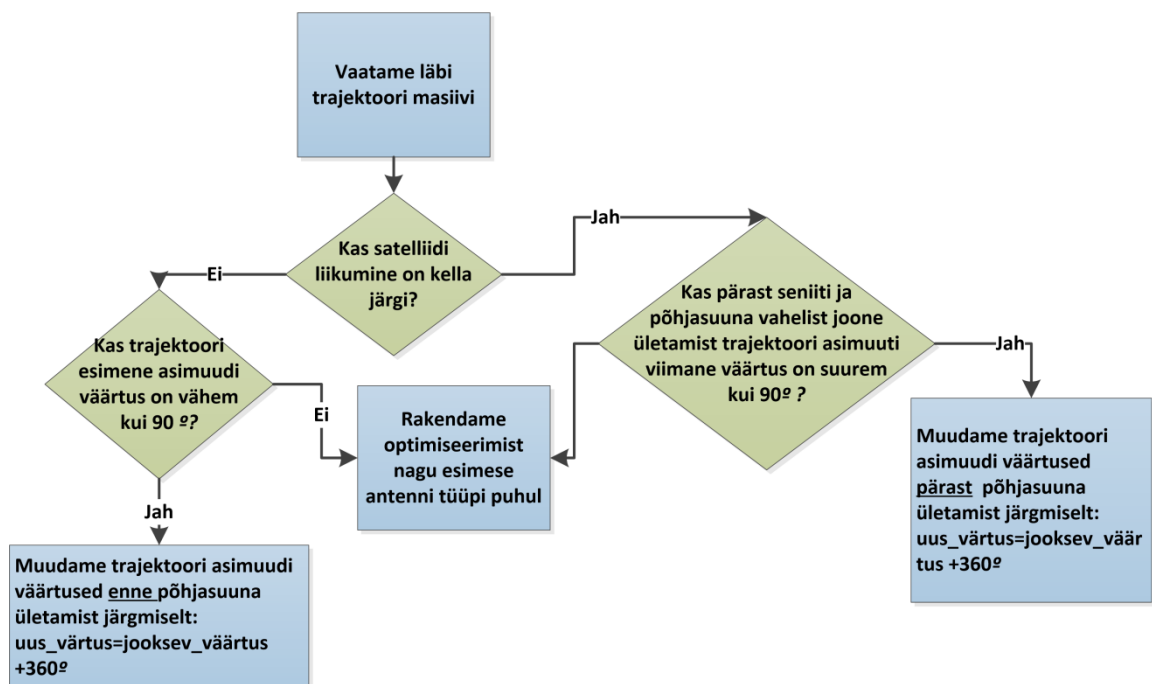
Jälgides satelliidi ülelende, mis kuuluvad 1. gruppi, optimeerimist ei tehta, kuna satelliidi trajektoori ei ületa nullasimuudi joont ja antennipöörajate liikumine ei ole piiratud.

2. ülelendude grupp

Kui tegemist on 2. grupi ülelennuga, siis et kasutada antud antennipööraja lisaulatust on vaja selgeks teha, kas trajektoori algus või lõpp-väärtus (sõltub satelliidi liikumise suu-

nast) jääb vahemikku 360 kuni 450 kraadi. Kui see on nii, siis antenn saab liikuda üle nullasimuudi joone ilma piiranguta. Vastasel juhul jõuab antennipööraja mehaanilise blokeeringuni.

Vaadatakse ülelennu trajektoor läbi. Tehakse selgeks, kas satelliidi trajektoor muutub paripäeva. Kui ei, siis kontrollitakse, kas trajektoori esimese asimuudi väärtus on väiksem kui 90 kraadi. Juhul kui ei, siis rakendatakse optimeerimist samal viisil nagu esimese antennipööraja tüübi jaoks. Kui esimese asimuudi väärtus on väiksem kui 90 kraadi, siis kõigile trajektoori asimuutide väärtustele enne seniidi ja põhjasuuna vahelise joone ületamist liidetakse 360 kraadi. Samad tingimused kontrollitakse juhul, kui satelliidi trajektoor muutub erinevusega, et koordinaate muudetakse pärast seniidi ja põhjasuuna vahelise joone ületamist (vt. joonis 20).



Joonis 20. 2. ülelendude gruppi trajektooride optimeerimine.

3. ja 4. ülelendude grupid

3. ja 4. ülelendude gruppide puhul kasutatakse optimeerimisi, mis on samad nagu Tartu Observatooriumi antennipööraja puhul.

5.5 Optimeeritud andmete edastamine antennipöörajas

Viimase etapina on käskude genereerimine antennipööraja draiveri jaoks. Käskude genereerimine toimub tavalise *FOR* tsükli sees, kus optimeeritud trajektoori koordinaatide

objektist võetakse asimuudi ja elevatsiooni paaride väärtuseid. Iga käsule lisatakse paisena aega, millal seda käsku lastakse välja AMQ serverist pöörajatesse. Genereeritud käsud edastatakse AMQ-sse ja sellega on optimeerimisprotsess lõppenud.

6 Satelliitide jälgimise optimeerimise testimine

Käesolevas bakalaureusetöös loodud lahenduse testimine on realiseeritud nii tarkvaraliselt, kasutades ühikteste (ingl. k. *unit tests*) kui ka reaalse riistvara peal, jälgides reaalseid satelliite.

Tarkvaraline testimine on jagatud kaheks osaks:

1. Arvutusmoodul:

- Asimuudi ja elevatsiooni paaride arvutamine.

2. Optimeerimise moodul:

- Antennipööraja tüübi tuvastamine.
- Ülelennu tüübi tuvastamine.
- Satelliitide jälgimise optimeerimise testimine erinevate tüüpi pöörajatega.

Riistvaraline testimine oli suunatud pideva side toetamisele (satelliidi jälgimine pidevalt) erinevate ülelendude gruppide puhul.

6.1 Vahendid

Tarkvaraliseks testimiseks kasutati:

- Eclipse Juno- Java tarkvaraarendusplatvorm, [\[11\]](#)
- JUnit – ühiktestimise teek Java keele jaoks, [\[12\]](#)
- Gpredict- millega genereeriti testandmed, millega võrreldi Orekiti tulemusi,
- CelesTrak- veebiteenus TLE-formaadis orbiidiparameetrite allalaadimiseks. [\[13\]](#)

Riistvaraline testimine:

- 1. antennipööraja tüüp: asimuut 360, elevatsioon 180,
- optimeerimise moodul- juhtimiskäskude genereerimiseks,
- CelesTrak- veebiteenus TLE-formaadis orbiidiparameetrite allalaadimiseks,
- veebikaamera, mis näitas antennide suunda,
- arvuti.

6.2 Tarkvaralise testimise tulemused

Realiseerides tarkvaralise testimise eesmärgi, saavutasin oma projektis üle 70 protsenti lähtekoodi kattumist testidega (vt. joonis 21).

Samuti, testimine oli kontrollitud kasutades Bamboo – tarkvara haldamise serveri abil.

[14] Testide tulemused on 3. lisas.

| Element | Coverage | Covered Instructio... | Missed Instructions | Total Instructions |
|------------------------------------|----------|-----------------------|---------------------|--------------------|
| eu.estcube.commanding | 81.9 % | 5,545 | 1,224 | 6,769 |
| src/main/java | 62.0 % | 1,936 | 1,189 | 3,125 |
| eu.estcube.commanding.analysis | 96.6 % | 287 | 10 | 297 |
| OptimizationType.java | 95.0 % | 95 | 5 | 100 |
| OverPassType.java | 93.8 % | 75 | 5 | 80 |
| PassAnalyze.java | 100.0 % | 117 | 0 | 117 |
| eu.estcube.commanding.calculation | 15.3 % | 187 | 1,033 | 1,220 |
| AMQsend.java | 0.0 % | 0 | 166 | 166 |
| Calculation.java | 17.0 % | 97 | 472 | 569 |
| ContactTimeProducerForTesting.java | 0.0 % | 0 | 92 | 92 |
| GenerateTestData.java | 0.0 % | 0 | 170 | 170 |
| MetaDataConsumer.java | 0.0 % | 0 | 133 | 133 |
| RotatorOptimizer.java | 100.0 % | 63 | 0 | 63 |
| RotatorTypeSelectorImpl.java | 100.0 % | 27 | 0 | 27 |
| eu.estcube.commanding.optimizers | 99.2 % | 385 | 3 | 388 |
| GlobalFunctions.java | 98.9 % | 269 | 3 | 272 |
| Optimization.java | 100.0 % | 116 | 0 | 116 |
| eu.estcube.commanding.rotator1 | 89.5 % | 748 | 88 | 836 |
| Rotator1.java | 100.0 % | 53 | 0 | 53 |
| Rotator1CrossElHigh.java | 95.0 % | 190 | 10 | 200 |
| Rotator1CrossElLow.java | 80.9 % | 262 | 62 | 324 |
| Rotator1NoCrossElHigh.java | 93.5 % | 229 | 16 | 245 |
| Rotator1NoCrossElLow.java | 100.0 % | 14 | 0 | 14 |
| eu.estcube.commanding.rotator2 | 85.7 % | 329 | 55 | 384 |
| Rotator2.java | 100.0 % | 53 | 0 | 53 |
| Rotator2CrossElHigh.java | 79.4 % | 131 | 34 | 165 |
| Rotator2CrossElLow.java | 87.3 % | 145 | 21 | 166 |

Joonis 21. Projekti koodi ühiktestidega kattuvus. Koodi kattuvust testidega kontrollisin Eclipse'i lisamooduliga EcEmma.[15]

Ühiktestid oli realiseeritud sellisel viisil, et *Gpredict*'ist olid võetud konkreetsete ülelendude andmed, mis olid kasutatud tulemuste võrdlemiseks igas testis.

Arvutuste testimiseks olid kirjutatud testid, mis oodatava tulemusena kasutasid *Gpredict*'ist võetud andmed. Need andmed edastatakse testimise funktsioonidele ja kontrollitakse, kas tulemused *Gpredict*'i tulemustega.

Antud mooduli testimiseks oli kasutatud 5. tabelis toodud anded:

Tabel 5. Kalkulatsiooni mooduli testimiseks oli kasutatud MASAT-1 satelliidi orbiidi andmed ja Tartu, Tähe-4 maajaama asukoha andmeid.

| Nimetus | Väärtus |
|--|---|
| MASAT-1 satelliidi TLE read. Read olid salvestatud 14:01:46, 24.02.2013. | 1 38081U 12006E 13054.10096693 .00039570 33082-5 86766-3 0 8907 2 38081 69.4788 93.7652 0662838 286.7841 66.1545 14.34813775 53317 |
| Maajaama pikkuskraadid | 26.73 kraadi |

| | |
|-----------------------------|-------------|
| Maajaama laiuskraadid | 58.3 kraadi |
| Maajaama kõrgus merepinnast | 59.0 m |

Testide tulemused on nähtavad 5. tabelist, kust on arusaadav, et antud tarkvaramoodul saab edukalt hakkama oma eesmärgiga

Tabel 6. Asimuudi ja elevatsiooni arvutamise tulemused.

| Nimetus | Jooksev tulemus | Oodatud tulemus |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|
| Asimuudi väärtus (kraadid) | 6.79 | 6.88 |
| Elevatsiooni väärtus (kraadid) | -15.91 | -15.94 |

Antennipöörade liikumise optimeerimise testimiseks oli võetud *Gpredict*'ist erinevate ülelendude gruppide trajektoore, mis olid optimeerimise funktsioonide sisendiks. Oodatava tulemusena oli kasutatud *Gpredict*'ist võetud ja käsitsi optimeeritud sisendandmeid (käsitsi arvutatud, kuna polnud allikat, kust võtta need optimeeritud andmed etalonina).

Iga erineva ülelennu grupi jaoks oli vajalik tuvastada selle grupp ja tagastada optimeeritud koordinaadid, et nad oleksid peaaegu samad nagu oodatavad tulemused.

Selle osaga sai optimeerimise moodul edukalt hakkama.

Antennipöörade liikumise optimeerimise testimise tulemusi on võimalik näha järgnevatest tabelitest.

6.2.1 Tartu Ülikooli satelliitide maajaama pöörade testimine

Testides Tartu Ülikooli satelliitide maajaama pöörade liikumise optimeerimist tarkvaraliselt sain järgmiseid tulemusi (vt. tabel 7 kuni 11).

6.2.1.1 2. ülelendude gruppide jälgimise optimeerimise testimine

Tabelist 7 on näha, et trajektoori asimuutide ja elevatsioonide paaride teisendamine toimub vastavalt algoritmi loogikale: asimuudi pöörade on suunatud satelliidiga vastas suunas ja elevatsiooni pöörade on suunatud satelliidiga samas suunas.

*Tabel 7. 2. ülelendude gruppi jälgimise optimeerimise testimiseks oli valitud ESTCube-1 satelliit. Testimine oli tehtud 22.05.2013, 18:34. Satelliidi TLE andmed olid järgmised:
1 39161U 13021C 13142.14354486 .00001483 00000-0 26165-3 0 465, 2 39161
98.1280 220.5365 0009624 190.4917 169.6097 14.68924241 2174*

| Mitteoptimeeritud | | Optimeeritud | | |
|-------------------|-------------|--------------|-------------|------------|
| Asimuut | Elevatsioon | Asimuut | Elevatsioon | Ülennu aeg |
| 69 | 0 | 249 | 180 | 19:47:53 |
| 66 | 1 | 246 | 179 | 19:48:20 |
| 63 | 2 | 243 | 178 | 19:48:48 |
| 59 | 3 | 239 | 177 | 19:49:15 |
| 55 | 3 | 235 | 177 | 19:49:42 |
| 51 | 4 | 231 | 176 | 19:50:10 |
| 46 | 5 | 226 | 175 | 19:50:37 |
| 41 | 5 | 221 | 175 | 19:51:04 |
| 37 | 6 | 217 | 174 | 19:51:32 |
| 32 | 6 | 212 | 174 | 19:51:59 |
| 27 | 6 | 207 | 174 | 19:52:26 |
| 22 | 6 | 202 | 174 | 19:52:54 |
| 17 | 5 | 197 | 175 | 19:53:21 |
| 12 | 5 | 192 | 175 | 19:53:48 |
| 8.0 | 4 | 188 | 176 | 19:54:16 |
| 3.0 | 3 | 183 | 177 | 19:54:43 |
| 359 | 3 | 179 | 177 | 19:55:11 |
| 356 | 2 | 176 | 178 | 19:55:38 |
| 352 | 1 | 172 | 179 | 19:56:05 |

6.2.1.2 3. ülelendude gruppide jälgimise optimeerimise testimine

Tabelist 8 on näha, et trajektoori asimuutide ja elevatsioonide paaride teisendamine toimub vastavalt algoritmi loogikale: asimuudi antennipööraja liigub vähesel määral ja satelliidi jälgimine toimub elevatsiooni pööraja abil.

Tabel 8. 3. ülelendude gruppi jälgimise optimeerimise testimiseks oli valitud COSMOS 1975 satelliit. Testimine oli tehtud 22.05.2013, 18:43. Satelliidi TLE andmed olid järgmised: 1 19573U 88093A 13141.64031157 .00001594 00000-0 13143-3 0 8735, 2 19573 82.5227 339.4064 0015286 308.8211 51.1647 14.98317273336536

| Mitteoptimeeritud | | Optimeeritud | | |
|-------------------|-------------|--------------|-------------|------------|
| Asimuut | Elevatsioon | Asimuut | Elevatsioon | Ülennu aeg |
| 346 | 0 | 346 | 0 | 18:50:26 |
| 346 | 2 | 346 | 2 | 18:51:07 |
| 346 | 5 | 346 | 5 | 18:51:47 |
| 346 | 9 | 346 | 9 | 18:52:28 |
| 346 | 12 | 346 | 13 | 18:53:08 |
| 346 | 18 | 346 | 18 | 18:53:49 |
| 346 | 25 | 346 | 25 | 18:54:29 |
| 346 | 35 | 346 | 35 | 18:55:10 |
| 346 | 50 | 346 | 50 | 18:55:51 |

| | | | | |
|-----|----|-----|-----|----------|
| 344 | 74 | 344 | 74 | 18:56:31 |
| 172 | 76 | 352 | 76 | 18:57:12 |
| 169 | 52 | 349 | 128 | 18:57:52 |
| 169 | 36 | 349 | 144 | 18:58:33 |
| 168 | 25 | 348 | 155 | 18:59:13 |
| 168 | 18 | 348 | 162 | 18:59:54 |
| 168 | 13 | 348 | 167 | 19:00:34 |
| 169 | 9 | 349 | 171 | 19:01:15 |
| 169 | 5 | 349 | 175 | 19:01:56 |
| 169 | 2 | 349 | 178 | 19:02:36 |

6.2.1.3 4. ülelendude gruppide jälgimise optimeerimise testimine

Tabelist 9 on näha, et trajektoori asimuutide ja elevatsioonide paaride teisendamine toimub vastavalt algoritmi loogikale: asimuudi antennipööraja on suunatud satelliidiga vastavasse suunda ja liigub vähesel määral. Satelliidi jälgimine toimub elevatsiooni pööraja abil.

Tabel 9. 4. ülelendude gruppi jälgimise optimeerimise testimiseks oli valitud RS-22 satelliit. Testimine oli tehtud 22.05.2013, 19:14. Satelliidi TLE andmed olid järgmised: 1 27939U 03042A 13142.56003996 .00000902 00000-0 17869-3 0 4336,2 27939 97.7984 331.7483 0012155 269.1264 90.8536 14.64445685515547

| Mitteoptimeeritud | | Optimeeritud | | |
|--------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| Asimuut | Elevatsioon | Asimuut | Elevatsioon | Ülelennu aeg |
| 14 | 0 | 374 | 0 | 18:50:26 |
| 14 | 2 | 374 | 2 | 18:51:07 |
| 14 | 6 | 374 | 6 | 18:51:47 |
| 14 | 9 | 374 | 9 | 18:52:28 |
| 14 | 14 | 374 | 14 | 18:53:08 |
| 13 | 19 | 373 | 19 | 18:53:49 |
| 12 | 26 | 372 | 26 | 18:54:29 |
| 10 | 37 | 370 | 37 | 18:55:10 |
| 6 | 52 | 366 | 52 | 18:55:51 |
| 348 | 73 | 366 | 73 | 18:56:31 |
| 233 | 75 | 390 | 75 | 18:57:12 |
| 210 | 54 | 390 | 126 | 18:57:52 |
| 205 | 38 | 385 | 142 | 18:58:33 |
| 203 | 27 | 383 | 153 | 18:59:13 |
| 202 | 20 | 382 | 160 | 18:59:54 |
| 202 | 14 | 382 | 166 | 19:00:34 |
| 201 | 9 | 381 | 171 | 19:01:15 |
| 201 | 6 | 381 | 174 | 19:01:56 |

| | | | | |
|-----|---|-----|-----|----------|
| 201 | 2 | 381 | 178 | 19:02:36 |
|-----|---|-----|-----|----------|

6.2.2 Tartu Observatooriumi satelliitside maajaama pöörjate testimine

Tartu Observatooriumi pöörjate optimeerimise testid olid tehtud ainult 2. ülelendude gruppi jaoks, kuna jälgides teisi ülelennu ta käitub samalt nagu Tartu Ülikooli satelliitside maajaama pöörjad.

Tabelist 10 on nähtav, et trajektoori asimuutide ja elevatsioonide paaride teisendamine toimub vastavalt algoritmi loogikale: trajektoori asimuutide väärtusi teisendatakse nii, et asimuudi antennipöörja saaks ületada põhjasuuna.

Tabel 10. 2. ülelendude gruppi jälgimise optimeerimise testimiseks oli valitud satelliit ESTCube-1 satelliit. Testimine oli tehtud 22.05.2013, 19:16. Satelliidi TLE andmed olid järgmised: 1 39161U 13021C 13142.14354486 .00001483 00000-0 26165-3 0 465, 2 39161 98.1280 220.5365 0009624 190.4917 169.6097 14.68924241 2174

| Mitteoptimeeritud | | Optimeeritud | | |
|-------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| Asimuut | Elevatsioon | Asimuut | Elevatsioon | Ülelennu aeg |
| 69 | 0 | 429 | 0 | 19:47:53 |
| 66 | 1 | 426 | 1 | 19:48:20 |
| 63 | 2 | 423 | 2 | 19:48:48 |
| 59 | 3 | 419 | 3 | 19:49:15 |
| 55 | 3 | 415 | 3 | 19:49:42 |
| 51 | 4 | 411 | 4 | 19:50:10 |
| 46 | 5 | 406 | 5 | 19:50:37 |
| 41 | 5 | 401 | 5 | 19:51:04 |
| 37 | 6 | 397 | 6 | 19:51:32 |
| 32 | 6 | 392 | 6 | 19:51:59 |
| 27 | 6 | 387 | 6 | 19:52:26 |
| 22 | 6 | 382 | 6 | 19:52:54 |
| 17 | 5 | 377 | 5 | 19:53:21 |
| 12 | 5 | 372 | 5 | 19:53:48 |
| 8 | 4 | 368 | 4 | 19:54:16 |
| 3 | 3 | 363 | 3 | 19:54:43 |
| 359 | 3 | 359 | 3 | 19:55:11 |
| 356 | 2 | 356 | 2 | 19:55:38 |
| 352 | 1 | 352 | 1 | 19:56:05 |

6.2.3 Riistvaraline testimine

Lisaks tarkvaralise testimisele oli tehtud ka riistvaraline testimine (reaalsetes olukordades). Testimine oli rohkem suunatud pideva satelliidi jälgimisele erinevate ülelendude gruppide puhul. Oli vaja aru saada, kas optimeerimise algoritmid tõesti töötavad nii, et antenn on koguaeg suunatud satelliidi poole.

Testimine oli tehtud ainult Tartu Ülikooli satelliitside maajaamas, kuna tol hetkel Tartu Observatooriumi maajaama antenn ei olnud veel seadistatud.

Testimise viis oli järgmine:

- Defineerime tabelis 2 määratud metaandmed,
- käivitame optimeerimise mooduli,
- kontrollime, kas käsud antennipöörajate jaoks jõuavad antennipöörajateni,
- kontrollime, kas antennipöörajad liiguvad käskude järgi.

Testimine näitas, et iga ülelendu tüübi jaoks optimeerimise algoritm töötab ja lubab jälgida Tartu Ülikooli satelliitside maajaamale satelliite pidevalt.

Tõestusena võib näidata AAUSAT3 satelliidi ülelennu optimeeritud trajektoori osa (vt. tabel 11), mis oli edastatud Tartu Ülikooli satelliitside maajaama antennipöörajatele (vt. joonis 22).

Tabel 11. AAUSAT3 satelliidi optimeeritud trajektoori osa. Trajektoori välja arvutamine oli tehtud 23.05.2013, 20:30. Satelliidi TLE andmed olid: 1 39087U 13009B 13143.08539338 .00000611 00000-0 23441-3 0 818, 2 39087 98.6314 333.2535 0013266 24.6778 335.5032 14.34037573 12399.

| Asimuut | Elevatsioon | Aeg |
|---------|-------------|----------|
| 373 | 14 | 20:36:07 |
| 372 | 17 | 20:36:34 |
| 371 | 20 | 20:36:58 |
| 370 | 20 | 20:37:00 |
| 369 | 23 | 20:37:20 |
| 368 | 26 | 20:37:38 |
| 367 | 27 | 20:37:48 |
| 367 | 29 | 20:37:55 |
| 365 | 32 | 20:38:11 |
| 364 | 33 | 20:38:19 |
| 364 | 35 | 20:38:25 |
| 362 | 38 | 20:38:37 |
| 361 | 38 | 20:38:40 |
| 359 | 41 | 20:38:51 |

```

- log: Received message in AMQ queue
- Message value is P 373 14 .Class is: java.lang.String
- Exchange[ExchangePattern:InOnly, BodyType:String, Body:P 373 14]
- log: Received message in AMQ queue
- Message value is P 372 17 .Class is: java.lang.String
- Exchange[ExchangePattern:InOnly, BodyType:String, Body:P 372 17]
- log: Received message in AMQ queue
- Message value is P 371 20 .Class is: java.lang.String
- Exchange[ExchangePattern:InOnly, BodyType:String, Body:P 371 20]
- log: Received message in AMQ queue
- Message value is P 370 20 .Class is: java.lang.String
- Exchange[ExchangePattern:InOnly, BodyType:String, Body:P 370 20]
- log: Received message in AMQ queue
- Message value is P 369 23 .Class is: java.lang.String
- Exchange[ExchangePattern:InOnly, BodyType:String, Body:P 369 23]
- log: Received message in AMQ queue
- Message value is P 368 26 .Class is: java.lang.String
- Exchange[ExchangePattern:InOnly, BodyType:String, Body:P 368 26]
- log: Received message in AMQ queue
- Message value is P 367 27 .Class is: java.lang.String
- Exchange[ExchangePattern:InOnly, BodyType:String, Body:P 367 27]
- log: Received message in AMQ queue
- Message value is P 367 29 .Class is: java.lang.String
- Exchange[ExchangePattern:InOnly, BodyType:String, Body:P 367 29]
- log: Received message in AMQ queue
- Message value is P 365 32 .Class is: java.lang.String
- Exchange[ExchangePattern:InOnly, BodyType:String, Body:P 365 32]
- log: Received message in AMQ queue
- Message value is P 364 33 .Class is: java.lang.String
- Exchange[ExchangePattern:InOnly, BodyType:String, Body:P 364 33]
- log: Received message in AMQ queue
- Message value is P 364 35 .Class is: java.lang.String
- Exchange[ExchangePattern:InOnly, BodyType:String, Body:P 364 35]
- log: Received message in AMQ queue
- Message value is P 362 38 .Class is: java.lang.String
- Exchange[ExchangePattern:InOnly, BodyType:String, Body:P 362 38]
- log: Received message in AMQ queue
- Message value is P 361 38 .Class is: java.lang.String
- Exchange[ExchangePattern:InOnly, BodyType:String, Body:P 361 38]
- log: Received message in AMQ queue
- Message value is P 359 41 .Class is: java.lang.String
- Exchange[ExchangePattern:InOnly, BodyType:String, Body:P 359 41]

```

Joonis 22. Tartu Ülikooli satelliitside maajaama antennipöörjate draiveri sõnumid, mis näitavad, et tabelis 11 määratud asimuutide ja elevatsioonide paarid jõuavad pöörjateni. Käsk kujul „P 372 17“ tähendab, et draiver annab asimuudipöörjale väärtus 372 kraadi ja elevatsiooni pöörjale 17 kraadi.

7 Kokkuvõte

Antud tööna valminud lahendus täitab väga hästi seatud eesmärged: välja arvutada satelliidi trajektoori ja optimeerida selle sellisel viisil, et antenn oleks suunatud satelliidi poole pidevalt erinevate ülelendude tüüpide puhul.

Antud probleemi lahendus on kirjutatud Java keeles. Satelliidi parameetrite välja arvutamiseks kasutatakse Orekit'i - orbitaaldünaamika Java teek.

Integreerides minu plaani *ESTCube-1* missioonjuhtivuskeskusesse, *ESTCube-1* meeskond sai kasutusele Java programmeerimise keeles kirjutatud tarkvaramooduli, mis lubab:

- kalkuleerida satelliidi jooksva asukohta,
- jälgida satelliidi pidevalt erinevate ülelendude gruppide puhul:
 - trajektooride puhul, mis ületavad põhjasuuna,
 - trajektooride puhul, mis on kõrged maajaama suhtes.
- lubab kasutada antud lahendust mitu pöörjate gruppide jaoks:
 - toetab Tartu Ülikooli ja Tartu Observatooriumi satelliitide maajaama antennipöörjate liikumise optimeerimist.
- on testitud kasutades ühik teste (*unit tests*):
 - lähtekoodi katmine testidega on üle 70 protsendi.
- saab edulaket hakkama reaalses olukordades:
 - oli testitud reaalses olukordades Tartu Ülikooli satelliitide maajaama puhul.

Selle lahendusega satelliidi pideva jälgimise probleem on lahendatud ja optimeeritud: erinevate ülelendude gruppide puhul side satelliidiga jääb pidevaks.

Probleemi lahendus tuleb laiendina Hummingbird'i - avatud lähtekoodiga Java teegi infrastruktuuri jälgimis- ja kontrollsüsteemide ehitamiseks

Edasi võiks seda süsteemi täiendada, lisades juurde teiste antennipöörjate tüüpide tuge, kuna loodud platvorm on lihtsasti laiendatav.

Antud lahendus tuleb kasuks ka teiste kosmosemissioonide meeskondade jaoks ja mõne aja pärast muutub avatud lähtekoodiga projektiks Hummingbird'i osana.

8 Summary

SATELLITES TRACKING OPTIMIZATIONS FOR GROUND STATIONS

Ivar Mahhonin

The main objective of this bachelors thesis is satellites tracking optimization for ground stations. Ground stations antennas movement is mechanically limited. It puts limits for tracking the objects on low-Earth orbit. Due to this fact contact with the satellite can change to discontinuous during one pass.

For University of Tartu satellite communication ground station it is important to support continuous connection with the ESTCube-1 satellite [1], because the success of the mission depends on it.

Satellite tracking optimization is universal problem for all the ground stations. There is no open source solution for this problem currently.

University of Tartu satellite communication ground station software is created using Hummingbird – open source infrastructure for building monitoring and control systems for remotes assets. [8]. There is no satellites tracking optimization module in Hummingbird, so was made a decision to create one.

The main objectives of this thesis were states as:

- design software module, which consists of satellite trajectory calculation for a given period and its processing to optimization module,
- module testing with unit and real-life tests,
- design optimization module, which analyzes satellite trajectory and generates commands for antenna rotators for continuous satellite tracking,
- optimization module testing with unit and real-life tests.

Integrating given objectives into ESTCube-1 mission control system, ground station team obtained software module, that can:

- calculate satellite trajectory for a next pass,
- track satellite continuously during different types of passes:
 - for the satellite trajectories, that cross azimuth null relatively to the ground station,
 - for the trajectories, that are high relatively to the ground station.
- allows to use this solution for the different types of rotators:

- supports satellites tracking optimization for University of Tartu and Tartu Observatory satellite communication ground stations.
- optimize satellite tracking for the ground stations.

Source code of this solution was tested with unit test (more than 80% is covered) and in real situations, where it has shown its ability to fulfill the objectives.

Current software module is suitable for implementing new rotator types and will be useful for other ground stations.

9 Kasutatud kirjandus

1. Janhunen, P., P.K. Toivanen, J. Polkko, S. Merikallio, P. Salminen, E. Haeggström, H. Seppänen, R. Kurppa, J. Ukkonen, S. Kiprich, G. Thornell, H. Kratz, L. Richter, O. Krömer, R. Rosta, M. Noorma, J. Envall, S. Lätt, G. Mengali, A.A. Quarta, H. Koivisto, O. Tarvainen, T. Kalvas, J. Kauppinen, A. Nuottajärvi and A. Obraztsov, “*Electric solar wind sail: Towards test missions (Invited article)*“, Rev. Sci. Instrum., 81, 111301, 2010.
2. Gpredict - real-time satellite tracking and orbit prediction application
<http://gpredict.oz9aec.net/>, viimati vaadatud 23.05.2013.
3. L. Snyder, „Orbital parameters“ <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Orbit1.svg>.
4. Celestrak, ISS (ZARYA) TLE
<http://www.celestrak.com/NORAD/elements/stations.txt>, viimati vaadatud 23.05.2013.
5. T. Carlson, „Horisoniline koordinaatsüsteem“
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Azimuth-Altitude_schematic.svg, viimati vaadatud 23.05.2013.
6. Tallinna Tehnika Ülikooli, Raadio- ja sidetehnika instituut, „Antennide parameetrid“ http://www.lr.ttu.ee/irm/antennid/2_Antennide_parameetrid.pdf, viimati vaadatud 23.05.2013.
7. Yagi antennide spetsifikatsioon http://www.wimo.de/cgi-bin/verteiler.pl?url=yagi-antennas-wimo_e.html, viimati vaadatud 23.05.2013.
8. Hummingbird ESTCube-1 missioonis <http://hbird.de/?q=project/estcube>, viimati vaadatud 23.05.2013.
9. Apache ActiveMQ <http://activemq.apache.org/>, viimati vaadatud 23.05.2013.
10. Orekit <https://www.orekit.org/forge/projects/orekit/wiki/Overview>, viimati vaadatud 23.05.2013.
11. Eclipse Juno <http://www.eclipse.org/juno/>, viimati vaadatud 23.05.2013.
12. JUnit <http://junit.org/>, viimati vaadatud 23.05.2013.
13. Celestrak <http://celestrak.com/>, viimati vaadatud 23.05.2013.
14. Bamboo <http://www.atlassian.com/software/bamboo/overview>, viimati vaadatud 23.05.2013.
15. EcClemma <http://www.ecclemma.org/>, viimati vaadatud 23.05.2013.

10 Lisad

Lisa 1. Lihtlitsents

Mina Ivar Mahhonin (ik. 39003152212) annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Satelliitide jälgimise optimeerimine maajaamades reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni; üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartu, 22.05.2013

(allkiri)

Lisa 2. Lähtekood

Tarkvaralise lahenduse lähtekood on lisatud DVD- ga.

Lisa 3. Bamboo testimise raaport

| Package | Files | % Filtered | Average Method Complexity | Uncovered Elements | TOTAL Coverage | |
|------------------------------------|---------|------------|---------------------------|--------------------|----------------|------------------------|
| eu.estcube.commanding.calculation | 7 | 0% | 1.9 | 213 | 19% | <div><div></div></div> |
| Class | Methods | % Filtered | Average Method Complexity | Uncovered Elements | TOTAL Coverage | |
| AMQsend | 4 | 0% | 1.25 | 30 | 0% | <div><div></div></div> |
| ContactTimeProducerForTesting | 1 | 0% | 1 | 20 | 0% | <div><div></div></div> |
| GenerateTestData | 2 | 0% | 4 | 45 | 0% | <div><div></div></div> |
| MetaDataConsumer | 2 | 0% | 1.5 | 31 | 0% | <div><div></div></div> |
| Calculation | 10 | 0% | 1.6 | 87 | 21.6% | <div><div></div></div> |
| RotatorOptimizer | 1 | 0% | 4 | 0 | 100% | <div><div></div></div> |
| RotatorTypeSelectorImpl | 1 | 0% | 3 | 0 | 100% | <div><div></div></div> |
| Package | Files | % Filtered | Average Method Complexity | Uncovered Elements | TOTAL Coverage | |
| eu.estcube.commanding.optimizators | 2 | 0% | 3.9 | 2 | 98.3% | <div><div></div></div> |
| Class | Methods | % Filtered | Average Method Complexity | Uncovered Elements | TOTAL Coverage | |
| Optimization | 3 | 0% | 3.33 | 2 | 94.6% | <div><div></div></div> |
| GlobalFunctions | 7 | 0% | 4.14 | 0 | 100% | <div><div></div></div> |
| Package | Files | % Filtered | Average Method Complexity | Uncovered Elements | TOTAL Coverage | |
| eu.estcube.commanding.rotator1 | 5 | 0% | 3.2 | 44 | 84.5% | <div><div></div></div> |
| Class | Methods | % Filtered | Average Method Complexity | Uncovered Elements | TOTAL Coverage | |
| Rotator1CrossElLow | 7 | 0% | 3.57 | 33 | 72.3% | <div><div></div></div> |
| Rotator1NoCrossElHigh | 3 | 0% | 6 | 7 | 91.4% | <div><div></div></div> |
| Rotator1 | 5 | 0% | 2 | 2 | 93.1% | <div><div></div></div> |
| Rotator1CrossElHigh | 3 | 0% | 3 | 2 | 95.7% | <div><div></div></div> |
| Rotator1NoCrossElLow | 2 | 0% | 1 | 0 | 100% | <div><div></div></div> |
| Package | Files | % Filtered | Average Method Complexity | Uncovered Elements | TOTAL Coverage | |
| eu.estcube.commanding.rotator2 | 3 | 0% | 2.44 | 22 | 86% | <div><div></div></div> |
| Class | Methods | % Filtered | Average Method Complexity | Uncovered Elements | TOTAL Coverage | |
| Rotator2CrossElHigh | 5 | 0% | 2.6 | 11 | 81.7% | <div><div></div></div> |
| Rotator2CrossElLow | 6 | 0% | 2.67 | 9 | 86.8% | <div><div></div></div> |
| Rotator2 | 5 | 0% | 2 | 2 | 93.1% | <div><div></div></div> |

Joonis 23. Bamboo serveri testimise raaport. Summaarne lähtekoodi kattuvus testidega on 71.95 %.